УДК 621.313

ЕМКОСТНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Р.Ф. Бекишев, Л.Н. Семенова, Д.Ю. Ляпунов

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-56-37-59

Обосновано использование тонкопленочных структур с высокими диэлектрическими свойствами для изготовления емкостных микродвигателей. Рассмотрена конструкция емкостного микродвигателя с цилиндрическим катящимся ротором. Показаны преимущества подобных устройств (минимизация размеров и невосприимчивость к магнитным полям) в сочетании со специфическими электрическими свойствами активных диэлектриков для применения емкостных микродвигателей в качестве преобразователей электрической энергии в механическую и датчиков в системах управления электроприводами в медицинской технике, робототехнике и других отраслях.

В последнее время интерес к электростатическим (емкостным) устройствам значительно возрос. Об этом свидетельствуют ряд публикаций [1–3]. Этот интерес вызван рядом причин. Во-первых, обладая малой мощностью, они менее чувствительны к электромагнитным помехам, в отличие от индукционных устройств такой же мощности. Во-вторых, обладая малыми размерами и весом, современные электростатические устройства имеют энергоемкость порядка 10 Дж/кг, в то время как энергоемкость индукционных устройств составляет всего лишь 1 Дж/кг [4].

Поэтому разработка конструкций и производство подобных электромеханических преобразователей является актуальной, востребованной и своевременной.

Основной класс таких устройств составляют двигатели. Емкостные двигатели, как и большинство электрических машин, состоят из ротора (подвижной части) и статора (неподвижной части). Основное их отличие от индукционных машин состоит в отсутствии магнитопровода и обмоток. Роль обмоток выполняют электроды [5].

Процессы электромеханического преобразования энергии в таких преобразователях следует рассматривать, произведя дуально-инверсную замену. При этом математические описания явлений в электрических и магнитных полях становятся идентичными [6].

Полезную работу в таких устройствах совершает не электромагнитное поле, а электрическое. Это поле создается посредством последовательной подачи напряжения возбуждения на электроды. Для вращения или перемещения ротора двигателя необходима притягивающая или отталкивающая сила. Она создается электрическим полем и пропорциональна изменению во времени электрической емкости между ротором и статором (взаимоемкости). Это достигается либо изменением закона подачи напряжения на статорные электроды, либо изменением величины взаимоемкости от минимальной до максимальной.

Устройства подобного типа представляют собой новую категорию электрических машин малой мощности. Основным условием при их конструировании является получение как можно большего количества энергии электрического поля в малом объеме.

Электрическая энергия распределена в пространстве с объемной плотностью

$$\omega = \frac{e_0 e^{E\,2}}{2},$$

следовательно, в конструкциях данных устройств целесообразно применение диэлектрических материалов, способных работать в области высоких напряженностей электрического поля (E) и имеющих высокую диэлектрическую проницаемость (ε).

В современных устройствах по основному показателю – объемной плотности энергии поля, тонкопленочные структуры сравнимы с традиционными индуктивными машинами. Данные структуры нашли широкое применение в пленочной электромеханике и планарной микромеханике [7].

В настоящее время получен и исследован ряд диэлектрических материалов, из которых изготовляют различные тонкопленочные структуры [7–11]. В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к таким структурам и условий их применения, выбор осуществляется в основном по следующим критериям: большая электроемкость при толщине пленки в пределах от 100 до 20000 Å, высокая относительная диэлектрическая проницаемость (до 100000), малый тангенс угла потерь, высокая электрическая и механическая прочность. Система «ротор-статор» в емкостной машине может рассматриваться упрощенно как конденсатор с подвижной обкладкой. По принципу работы емкостные двигатели делятся на индукционные и кондукционные [12].

Индукционная машина – это устройство, в котором ротор и статор связаны только посредством влияния на них электрического поля и не имеют непосредственного электрического и механического контакта. Электростатическое отталкивание и притягивание между заряженными электродами на статоре и зарядами на поверхности электродов ротора используется для приведения ротора во вращение внутри статора, причем зазор между статорными и роторными электродами очень мал.

Кондукционная машина – это устройство, в котором ротор и статор связаны посредством влияния на них электрического поля при механическом контакте ротора со статором. При этом движение на выходе двигателя может быть линейным, возвратно-поступательным или вращательным. Ротор при этом может быть металлическим или диэлектрическим. Движение ротора происходит либо по наружной, либо по внутренней стороне статорной поверхности в поочередном механическом контакте со статорными электродами в соответствии с подачей на них питающего напряжения.

Взаимоемкость между ротором и статором определяется величиной промежутка между поверхностями

ротора и статора. В индукционном двигателе между ротором и статором необходимо выполнять воздушный зазор, нужный для свободного движения ротора. При таком условии систему «ротор-статор» можно рассматривать как двухслойный конденсатор, емкость которого определяется как [11]:

$$C=\frac{C_0 R_0^2+C_\varepsilon R_\varepsilon^2}{\left(R_0+R_\varepsilon\right)^2}=$$

$$=C_\varepsilon\cdot\frac{1+C_0/C_\varepsilon\cdot\left(R_0/R_\varepsilon\right)^2}{\left(1+R_0/R_\varepsilon\right)^2},$$

где C_0, R_0 – соответственно емкость и сопротивление воздушного зазора; C_ε, R_ε – соответственно емкость и сопротивление диэлектрика.

Для получения большой емкости, обусловленной введением в систему диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, необходимо, чтобы R_0 стремилось к нулю. В реальных конструкциях величина воздушного зазора больше толщины диэлектрика, поэтому взаимоемкость будет меньше емкости одного воздушного зазора между ротором и статором. Таким образом, введение диэлектрической среды в систему не приводит к улучшению основного параметра емкостного двигателя.

При использовании двигателя кондукционного типа – двигателя качения [2] воздушный промежуток между ротором и статором уничтожается при механическом контакте – качении ротора по цилиндрической поверхности внутри статора. При этом максимальная взаимоемкость определяется параметрами диэлектрической пленки и площадью

$$C_{max}=\frac{\varepsilon_д S}{h_д},$$

где $\varepsilon_д$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость пленки, $h_д$ – ее толщина.

При качении ротора по внутренней поверхности статора емкость изменяется до минимального значения.

Так как величина емкости обратно пропорциональна величине напряжения на конденсаторе, а взаимоемкость «ротор-статор» в основном будет определяться свойствами диэлектрика между статором и ротором, то введение диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью приводит к возможности снижения напряжения возбуждения при тех же требуемых выходных параметрах. Таким образом, повышение диэлектрической проницаемости пленки приводит к заметному улучшению одной из основных характеристик емкостного двигателя.

В данной работе рассмотрена конструкция емкостного кондукционного двигателя качения с диэлектрическим ротором, покрытым тонкой пленкой, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость.

На рисунке представлена конструктивная схема емкостного двигателя, который, согласно классификации емкостных машин [12] представляет собой синхронный кондукционный биполярный с независимым возбуждением двигатель качения. Данный двигатель имеет частоту вращения в соот и

$$n=k_p n_1=\frac{D_1-D_2}{D_2}n_1,$$

где n_1 – синхронная частота вращения поля; $k_p < 1$ – коэффициент редукции частоты вращения, D_1 и D_2 – диаметры статора и ротора.

Приняты следующие обозначения:

h – толщина слоя тонкой диэлектрической пленки на поверхности ротора;

e – эксцентриситет;

E_1 и E_2 – напряженности электрического поля в диэлектрике и E'_1 и E'_1 – в системе «металл-диэлектрик»;

F_x – результирующая сила, перемещающая ротор в результате взаимодействия силы тяжести и кулоновских сил.

Ротор – 1 представляет собой цилиндрический вал из алюминиевого сплава с нанесенной на его специально обработанную по 12–14 классу рабочую поверхность тонкой диэлектрической пленки титаната бария – 2. Статор – 3 представляет собой полый двухслойный цилиндр с наружным изоляционным слоем, в толщине которого радиально расположены проводящие электроды – 4, разделенные между собой материалом изоляционного слоя путем расточки внутренней поверхности статора. К электродам последовательно подается постоянное напряжение возбуждения через устройство переключения фаз. Ротор помещается внутрь статора и его выходной конец фиксируется прорезью передающего диска, ось вращения выходного вала которого параллельна оси статора. Выходной вал передающего диска фиксируется подшипниковой полиамидной втулкой. Другой конец ротора обкатывает установленную по оси статора в заднюю крышку латунную втулку, на которую подается

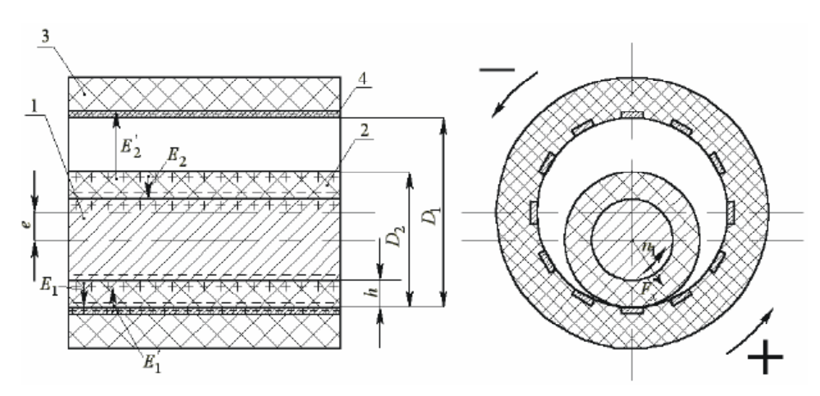


Рисунок. Конструктивная схема емкостного двигателя

сигнал отрицательной полярности для поддержания необходимого количества поверхностных зарядов на роторе.

При достаточно высокой частоте подачи импульсов на электроды и малом значении k_p представляется возможным получать низкие частоты вращения вала без применения внешних механических редукторов. В этом смысле двигатель с катящимся ротором выполняет функцию редукторного двигателя и обладает рядом преимуществ: хорошими пусковыми свойствами, высоким быстродействием при включении и реверсе, самоторможением и др.

При подаче напряжения питания на статор внутри статора между диаметрально расположенными электродами формируется совокупность векторов напряженности электростатического поля возбуждения.

При отсутствии сигнала напряжения возбуждения ротор под действием силы тяжести находится в крайней нижней точке внутреннего диаметра статора в зазоре между электродами.

При последовательном переключении сигнала возбуждения с одной пары статорных электродов на соседнюю происходит периодическое изменение величины взаимоемкости «ротор-статор» от минимальной до максимальной и наоборот. В результате формируется дискретно вращающиеся векторы электрического поля, которые и наводят силу одностороннего притяжения ротора к статору, вектор которой вращается синхронно с электрическим полем (рисунок). Ротор обкатывает внутреннюю поверхность статора в соответствии с направлением переключения напряжения возбуждения.

Результирующая сила определяется выражением

$$\Phi_\xi = Y^2 A_1 + Y A_2 + A_3,$$

где U – амплитуда напряжения возбуждения, A_1, A_2, A_3 – постоянные величины для выбранной конструкции, учитывающие геометрию и свойства активного диэлектрика.

Выходной конец ротора, описывающий в пространстве гипоциклоиду, приводит во вращательное движение передающий диск. Выходной вал этого диска подсоединяется к нагрузке двигателя. Регулирование направления вращения производится сменой направления подачи напряжения на пары электродов статора. Величина скорости вращения выходного вала двигателя регулируется устройством переключения напряжения возбуждения.

При конструировании подобных микродвигателей необходимо исходить из характера нагрузки (низкая скорость, высокий момент на валу, временной режим работы, условия пуска и останова), условий работы (агрессивность среды, электромагнитные излучения, температурный режим), себестоимости изготовления (высокие технологии, применение недорогих материалов, серийный техпроцесс). В зависимости от этого осуществляется выбор параметров устройства, выходная мощность источников питания, электротехнические свойства диэлектрических материалов. В настоящее время создание тонкопленочных емкостных микромашин идет с учетом свойств активных диэлектриков – сверхвысокие диэлектрические проницаемости, явление электрического гистерезиса, наличие точки Кюри, увеличения пробивной напряженности поля и электрической долговечности пленок с уменьшением их толщины.

Использование основных преимуществ изготовления емкостных двигателей с применением тонкопленочных технологий – минимизация размеров и невосприимчивость к электромагнитным помехам – открывает возможность использования подобных устройств в медицинской технике (микрохирургия), в робототехнике и других отраслях. Именно там к двигателям предъявляются требования миниатюрных веса и размеров, сопоставимых с размерами блоков управления системами в сочетании с опасной для жизни человека окружающей средой (загазованность, высокие температуры, электромагнитные и жесткие космические излучения). Наличие у активных диэлектриков специфических электротехнических свойств позволяет использовать подобные микродвигатели в виде различных датчиков в системах управления электроприводами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 905966 СССР. МКИ[3] H02N 1/08. Емкостный двигатель постоянного напряжения / В.А. Челухин. – Опубл. 15.02.82. Бюллетень № 6.
2. Tsuneji Y., Minoru S., Katumi H. Development of Wobble Motors // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. № 92–58. – 1992. – № 549. – P. 1628–1633.
3. Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Потапов Б.С., Пьянков Ю.А. Планарные электрические микродвигатели // Электричество. – 1996. – № 1. – С. 9–18.
4. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
5. Бекишев Р.Ф., Семенова Л.Н. Использование тонкопленочной технологии при конструировании емкостных микродвигателей // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: Матер. восьмой Всеросс. науч.-техн. конф. – Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2003. – С. 63–70.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
7. Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Потапов Б.С., Фадеев С.И. Пленочная электромеханика. – Новосибирск: Наука, 1991. – 247 с.
8. Щеглов В.А., Меньших С.А., Рыбакова Л.Ф., Томашпольский Ю.Я. Получение сегнетоэлектрических пленок $BaTiO_3$ и $PbTiO_3$ модифицированным золь-гель методом // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36. – № 4. – С. 470–475.
9. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 367 с.

10. Li C.L., Chen Z.H., Zhou Y.L., Cui D.F. Effect of oxygen content on the dielectric and ferroelectric properties of laser-deposited $BaTiO_3$ thin films // J. Phys. Condens. Matter. – 2001. – V. 13. – P. 5261–5268.
11. Prakash D., Sharma B.P., Rama Mohan T.R., Gopalan P. Flux addition in Barium Titanate: overview and prospects // J. Solid State Chemistry. – 2000. – V. 155. – P. 86–95.
12. Полотовский Л.С. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 155 с.

УДК 621.312